

Справочник по наилучшим доступным техническим методам использования энергоресурсов в стекольной промышленности: Производство сортового и тарного стекла

Материалы подготовлены на основе Справочника по наилучшим доступным методам в стекольной промышленности (2001), подготовленного в рамках реализации Директивы ЕС о комплексном контроле и предотвращении загрязнения (Директива 96/61/ЕС, «ККПЗ»).

Документ подготовлен РОО «Эколайн» в рамках проекта «Пропаганда энергоэффективности и снижения выбросов парниковых газов в стекольной промышленности России», выполняющегося при поддержке Министерства иностранных дел Великобритании в рамках Фонда глобальных возможностей (GOF).



Содержание

Введение.....	3
Стекольная отрасль ЕС.....	3
Производство тарного стекла.....	4
Производство сортового стекла.....	7
Типичный укрупненный материальный баланс.....	9
Потребление энергии на процесс.....	9
Стеклотарное производство.....	13
Производство сортового стекла.....	15
Выбор методов для оптимизации энергопотребления стекловарения.....	17
Регенеративные печи.....	18
Рекуперативные печи.....	19
Принудительное кислородное дутье.....	19
Стекловарение с комбинированным использованием ископаемого топлива и электроэнергии.....	23
Стекловарение в электрических печах.....	23
Периодическое плавление шихты.....	24
Методы для снижения потребления энергии при стекловарении.....	25
Выбор методов стекловарения и конструкции печи.....	25
Управление горением и выбор источника энергии.....	26
Уменьшение отношения воздух-топливо.....	26
Использование стеклобоя.....	27
Котлы-утилизаторы избыточной теплоты.....	28
Подогрев шихты и стеклобоя.....	28

Введение

Стекольная отрасль ЕС

Стекольная отрасль в ЕС охватывает широчайшее разнообразие процессов — от малосерийного ручного производства хрустальных бокалов до огромных объемов стекла, производимого с помощью флоат-процесса для строительной и автомобильной отраслей. Методы производства также варьируют от малых печей с электрическими нагревательными элементами в производстве керамического волокна до огромных регенеративных печей с поперечным направлением пламени при производстве листового стекла флоат-процессом, производительностью до 700 т стекломассы в сутки. В соответствии с областью действия Директивы ККПЗ, в материалы данного справочника вошли только предприятия с мощностью по съему стекломассы более 20 т продукции в сутки, хотя стекольная отрасль в ЕС включает и меньшие предприятия, отвечающие, впрочем, за производство менее 5% стекольной продукции по массе.

Стекольная отрасль по существу является товарной, хотя при производстве больших партий разработаны различные способы получения дополнительной добавленной стоимости для сохранения конкурентоспособности. Более 80% продукции отрасли продается в другие отрасли, и стекольная промышленность как единое целое очень сильно зависит от строительной промышленности, производства продуктов питания и напитков. Однако ряд подотраслей малого объема производства ориентируется на продукцию с высокой добавленной стоимостью для промышленности или конечного потребителя.

Общее производство отрасли в 1996 г. в ЕС оценивалось в 29 млн. т (исключая керамическое волокно и фритты).

В конце 90-х годов XX века стекольная промышленность продолжала претерпевать реорганизацию. Для снижения затрат и повышения конкурентоспособности на международном рынке, а также для получения преимуществ, связанных с увеличенным размером, компании объединялись и число независимых компаний уменьшалось. Компании, доминирующие в отрасли, становятся все более международными в своей деятельности, а потребители все более требовательными к однородности качества, вне зависимости от страны. Стекольная отрасль ЕС находится на передовой внедрения технических новинок и таким образом, вероятно, получит преимущества в результате повышения эффективности производства в последующие годы.

Значительное число подотраслей используют крупные стекловаренные печи непрерывного действия с продолжительностью кампании до 12 лет. Такие печи связаны со значительными капитальными вложениями, и периодические холодные ремонты определяют естественный инвестиционный цикл для процесса. Существенное изменение технологического оформления стекловарения наиболее эффективно может быть реализовано во время холодных ремонтов. Это также может быть справедливым для сложных вторичных мер по охране окружающей среды, которые должны быть рассчитаны на конкретные характеристики печей. В то же время реализация значительной доли усовершенствований работы печей, включая установку вторичных мер, возможна во время кампании печи. Для меньших печей, для которых характерны более частые ремонты и меньшие капитальные затраты, преимущества осуществления улучшений в экологической результативности во время ремонтов печи менее существенны, но в любом случае их следует координировать с другими инвестициями в процесс.

Производство стекла — очень энергоемкий процесс, и выбор источника энергии, метода нагрева и рекуперации теплоты являются определяющими для конструкции печи. Те же самые альтернативы являются и одними из наиболее значимых факторов, определяющих экологическую результативность и энергоэффективность стекловарения. Основными источниками энергии для производства стекла являются природный газ, жидкое топливо и электроэнергия.

В среднем энергия, необходимая для стекловарения, составляет более 75% совокупной энергии, требующейся для производства продукции из стекла. Стоимость энергии для стекловарения является также одной из самых значительных статей текущих расходов для стекольных предприятий и представляет собой значительный стимул для снижения потребления энергии. Основные методы

для снижения потребления энергии перечислены ниже и подробнее описаны в основной части Справочника:

- Метод стекловарения и конструкция печи (напр., регенераторы, рекуператоры, электрические печи, печи с принудительным кислородным дутьем, комбинированные печи с электроподогревом).
- Управление процессом горения и выбор топлива (напр., горелки с низким образованием NO_x , стехиометрическое горение, сжигание газа или жидкого топлива).
- Использование стеклобоя.
- Нагревательные котлы для утилизации избыточной теплоты.
- Подогрев шихты/стеклобоя.

Производство тарного стекла

Производство тарного стекла — крупнейшая подотрасль стекольной промышленности в Европе (60% совокупного производства в 1996 г.). В 1997 г. в рамках подотрасли в ЕС было произведено более 17.3 млн. продукции из стекла. В ЕС функционирует около 70 компаний подотрасли, оперирующих примерно 140 предприятиями с 295 стекловаренными печами. На предприятиях подотрасли задействовано около 50000 человек. В 1997 г. продажи подотрасли превысили 6 млрд. Евро. Тарное стекло производится во всех странах ЕС за исключением Люксембурга. Масштабы предприятий показаны в табл. 1. Тара для напитков составляет около 75 % по массе от общего количества производимой тары; около 20 % занимает производство тары для пищевой промышленности, в основном — широкогорлой. При этом важной частью сектора является также производство относительно дорогостоящих емкостей для фармацевтической и парфюмерной промышленности, отвечающей за производство оставшихся 5%. Значительным вкладом в развитие отрасли явилось использование вторичного стекла. Средняя доля применения вторичного (после использования) стекла в тарной подотрасли ЕС составляет около 50% от используемых сырьевых материалов, причем некоторые предприятия вовлекают в процесс до 90% вторичного стекла.

Важной характеристикой подотрасли являются относительно малые расстояния доставки, ограниченные несколькими сотнями километров, поскольку стоимость транспортировки относительно высока по сравнению с ценой контейнера.

В подотрасли используются практически все методы варки стекла. По составу производится натрий-кальций-силикатное стекло. Формование изделий осуществляется в две стадии, первичное формование заготовки или прессованием поршнем, или выдуванием сжатым воздухом, и окончательное формование выдуванием для получения законченной пустотелой формы. Производство тарного стекла осуществляется практически исключительно с помощью секционных машин.

Таблица 1. Число предприятий тарной подотрасли стекольной промышленности ЕС в зависимости от производительности

Диапазон производительности (т/сут)	<150	150 .. 300	300 .. 600	600 .. 1000	>1000
Число предприятий	14	37	57	28	4

Производство стекла представляет капиталоемкую отрасль промышленности и таким образом, выход на рынок возможен только для относительно крупных компаний со значительными финансовыми ресурсами. В долгосрочной перспективе наблюдаемый незначительный рост говорит о том, что хотя новые печи и запускаются, они строятся в основном либо уже действующими в этом районе компаниями, либо другими существующими компаниями, приходящими в этот регион. Значительная доля роста продаж обеспечивается модернизацией существующих производств во время холодных ремонтов. В целом, отмечается тенденция передачи собственности от малых к крупным компаниям.

В целом, печи тарной подотрасли работают в непрерывном режиме, или с небольшим промежуточным ремонтом, вплоть до 12 лет, после чего они перестраиваются с частичной или полной за-

менной конструкции в зависимости от ее состояния. Собственно ремонт средней печи (около 250 т/сут) обойдется в 3-5 млн. Евро. Реальные расходы могут быть значительно выше, поскольку холодный ремонт — удобное время для модернизации процесса. Новое предприятие сравнимого размера на неподготовленной площадке будет стоить от 40 до 50 млн. Евро, включая создание инфраструктуры и необходимое обеспечение.

В табл. 2. приведены примеры основных характеристик различных стекловаренных печей подотрасли.

Таблица 2. Примеры стекловаренных печей для производства стеклотары, установленных в ЕС

Печь	Тип печи	Топливо	Производительность (т/сут)	Стеклобой (%)	Удельное потребление энергии на варку (ГДж/т)	Комментарии
1.	Регенеративная с поперечным направлением пламени	Газ	370	72	3.49	Подогреватель стеклобоя/шихты, первичные меры по снижению NO _x , электрофильтр
2.	Регенеративная с поперечным направлением пламени	Газ	370	28	4.12	
3.	Регенеративная с поперечным направлением пламени	Жидкое	400	50	4.54	Первичные меры по снижению NO _x
4.	Регенеративная с подковообразным направлением пламени	Жидкое	70	41	7.16	Высококачественное бесцветное стекло для парфюмерии
5.	Регенеративная с подковообразным направлением пламени	Газ	244	10	5.35	Недавно осуществлен переход на газ
6.	Регенеративная с подковообразным направлением пламени	Жидкое	300	80	3.94	Установка адсорбции кислых газов, электрофильтр, котел-утилизатор (общий для двух печей)
7.	Прямого нагрева с принудительным кислородным дутьем	Газ	80	38	5.98	Боросиликатное стекло для фармацевтики, электрофильтр
8.	Рекуперативная	Газ	400	н/д	5.22	Первичные меры по снижению NO _x
9.	Прямого нагрева с принудительным кислородным дутьем	Газ	350	65	3.35	Рукавный фильтр, котел-утилизатор
10.	Прямого нагрева с принудительным кислородным дутьем	Газ	310	84	3.35	Подогреватель стеклобоя непрямого нагрева, рукавный фильтр, котел-утилизатор

Производство сортового стекла

Производство **сортового стекла** — чрезвычайно разнообразная подотрасль, в которую входит выпуск широкого спектра продукции с помощью разнообразных процессов. Вклад производства подотрасли в ЕС в 1996 г. составил 3.6% по массе. Выпуск сортового стекла очень широко распространен в ЕС, где функционируют около 140 предприятий; примерно 40 из них производительно-стью более 20 т стекломассы в сутки. Совокупный объем производства в 1997 г. составил более 1 млн. т; на предприятиях подотрасли было занято около 90000 человек. Рост производства в ЕС с 1986 по 1997 годы был крайне незначительным, в отдельные годы наблюдался спад. Масштабы предприятий подотрасли показаны в табл. 3.

Таблица 3. Число предприятий по производству сортового стекла в ЕС в зависимости от производительности (оценка)

Диапазон производительности (т/сут)	<20	20 .. 50	50 .. 100	100 .. 200	>200
Число предприятий	>90	20	14	5	2

К подотрасли относится производство столовой посуды из стекла, посуды для приготовления пищи и декоративных предметов, включая бокалы, чашки, вазы, тарелки и проч. Бокалы обеспечивают более 50% объемов производства.

Большая часть продукции производится из натрий-кальций-силикатного стекла, бесцветного или окрашенного. Свинцовый хрусталь и хрустальное стекло используются для производства бокалов, графинов, ваз и декоративных предметов. Опаловое стекло используется для производства столовой посуды и части посуды для приготовления пищи. Боросиликатное стекло используется для изготовления термостойкой посуды, более известной под торговыми марками (в скобках — компания-производитель) Arcuisine (Vca.), Duran (Schott) и Pyrex (Newell).

В подотрасли применяются малосерийное ручное производство изделий из свинцового хрусталя, и механизированные методы для производства больших партий посуды из стекла. Используются практически все способы стекловарения, от горшковых печей до больших регенеративных печей. Формование стеклоизделий может осуществляться автоматическим, ручным или полуавтоматическим способами, и в дальнейшем заготовки могут подвергаться холодной обработке (например, на свинцовом хрустале часто нарезают грань, а затем его полируют).

Количество потребителей сектора, естественно, чрезвычайно велико, но непосредственно продажи осуществляются обычно крупным оптовым компаниям и торговым сетям, хотя часть производителей и осуществляет продажи непосредственно потребителям. Различные части подотрасли подвержены действию широкого диапазона факторов, среди которых важную роль играют вкусы потребителей и социальные тенденции. Для производителей чрезвычайно важно быть впереди таких изменений и реагировать на них соответствующим образом, таким образом, гибкость является важной частью обычного производственного процесса. В результате состав шихты должен адаптироваться под конкретные требования производимой продукции и её последующей обработки, и даже состав шихты для обычного натрий-кальций-силикатного стекла может сильно отличаться от составов для тарного или листового стекла. Механизация в производстве продукции из свинцового хрусталя привела к выпуску более дешевых предметов по качеству приближающихся к тем изделиям с что обрабатываются вручную. В то же время, эта категория продукции особенно чувствительна к восприятию потребителей и существует спрос на продукцию ручного производства и при более высокой цене.

Так же как и в других подотраслях, производство сортового стекла — сложившийся бизнес, испытывающий ограниченный долгосрочный рост потребления. Продукция относительно легко перевозится, и объем международной торговли весьма значителен. Основными угрозами для подотрасли в ЕС является конкуренция на местном рынке с растущим объемом импортной продукции, и рост конкуренции на важных внешних рынках. Это привело к серьезному давлению на цены и

уменьшению прибыльности. В 1996 г. экспорт и импорт в ЕС составляли, соответственно, 34 % и 17 % объемов производства в ценовых величинах. Основная доля импорта была представлена Турцией и Восточной Европой, причем импорт существенно перевешивал экспорт из ЕС в эти регионы.

Как и другие подотрасли, производство стекла в больших объемах является капиталоемким, требуя значительных долгосрочных инвестиций. Это отражается в малой доле производителей сортового стекла, использующих печи более чем на 20 т стекломассы в сутки. Хотя эти компании и производят большую долю сортового стекла в ЕС, подотрасль необычна тем, что имеется значительная доля малых, менее капиталоемких предприятий, часто специализирующихся на дорогих предметах ручного производства или конкретных рыночных нишах. Небольшие объемы стекла могут готовиться в горшковых печах или ваннных печах периодического действия, которые относительно дешевы в строительстве и функционировании, но никогда не смогут конкурировать на рынках больших объемов.

Подотрасль сортового стекла использует большой спектр типов и размеров печей, для которых характерны различные по продолжительности кампании. Большие печи на ископаемом топливе могут функционировать в течение 5-8 лет до холодного ремонта, для электрических печей этот период составляет от 3 до 6 лет, а для горшковых печей — от 10 до 20 лет при замене горшка каждые 3-12 мес. Для типичной электрической печи для производства хрусталя производительностью 30 т стекломассы в сутки холодный ремонт обойдется в сумму около 2 млн. Евро, а новая печь будет стоить 8 млн. Евро. Для типичной печи для натрий-кальций-силикатного стекла производительностью 130 т в сутки, использующей газ или жидкое топливо, стоимость холодного ремонта составит приблизительно 4 млн. Евро, а стоимость новой печи — 12 млн. Евро.

Практически весь объем собственного стеклобоя используется вторично, а в тех случаях, когда это невозможно, если это позволяют требования к качеству, стеклобой обычно перерабатывается стеклотарными предприятиями, (за исключением свинцового хрусталя и хрустального стекла). Ограничения по качеству обычно не позволяют использовать сторонний (привозной) стеклобой.

В таблице 4 приведены примеры основных характеристик различных стекловаренных печей подотрасли.

Таблица 4. Примеры стекловаренных печей для производства сортового стекла, установленных в ЕС

Печь	Тип печи	Топливо	Производительность (т/сут)	Удельное потребление энергии на варку (ГДж/т)	Комментарии
11.	Регенеративная с подковообразным направлением пламени	Основное — газ, может использовать жидкое топливо	165	4.8	Первичные меры по снижению NO _x
12.	Регенеративная с подковообразным направлением пламени	Газ	65	6.5	Первичные меры по снижению NO _x
13.	Комбинированная рекуперативная стекловаренная печь	Газ и электроэнергия	30	9.5	Рукавный фильтр
14.	Электрическая печь	Электроэнергия	28	4.1	Рукавный фильтр
15.	Регенеративная с подковообразным направлением пламени	Газ	165	4.96	Особо чистое натрий-кальций-силикатное стекло. Первичные меры по снижению NO _x
16.	100 % электрическая печь	Электроэнергия	65	3.42	Опаловое стекло Печь с холодным сводом, рукавный фильтр, оптимизированный для снижения выбросов состав шихты
17.	100 % электрическая печь	Электроэнергия	32	3.8	Бессвинцовое хрустальное стекло. 35 % стеклобоя.
18.	100 % электрическая печь	Электроэнергия	48	3.7	Особо чистое натрий-кальций-силикатное стекло. Мокрый скруббер, 40% стеклобоя
19.	Рекуперативная	Газ	34	н/д	Электрофильтр

Типичный укрупненный материальный баланс

Потребление энергии на процесс

В последние десятилетия в основном для производства стекла в ЕС использовалось жидкое топливо, хотя сейчас растет использование природного газа. Использовались различные категории жидкого топлива от мазута до керосина, с различающейся чистотой и содержанием серы. Многие большие печи оборудованы таким образом, что могут использовать и жидкое топливо и природный газ, и вполне обычной является ситуация, когда печь, в основном использующая природный газ, сжигает в одном или двух горелках жидкое топливо. Третьим обычным источником энергии для производства стекла является электроэнергия, которая может использоваться либо как единственный источник, либо в комбинации с ископаемыми топливами. Электрические печи с резистив-

ными нагревательными элементами — метод, нашедший широкое коммерческое применение в стекольной промышленности. Непрямое электрическое нагревание использовалось только для очень малых ванн и горшковых печей или для нагрева части ванны (например, в выработочной части печи или питателях).

Обычно энергия, необходимая для стекловарения, соответствует более 75% общего энергопотребления стекольного производства. Другими значимыми областями энергопотребления являются питатели, процесс формования, отжиг, обогрев предприятия и общее обеспечение. Типичное распределение потребления для стеклотарного производства: печь, включая выработку — 79%, питатели — 6%, сжатый воздух — 4%, охлаждение форм — 2%, леры — 2% и остальное — 6%. В рамках настоящего документа данные в отношении энергии приводятся для точки использования и не переводятся в величины необходимой первичной энергии¹. Хотя между подотраслями существуют заметные различия, пример стеклотарного производства может рассматриваться как характерный для стекольной промышленности.

Основными источниками энергии для стекловарения являются мазут или природный газ, иногда с небольшой долей (до 5% энергии) электроподогрева. Питатели и леры нагреваются газом или электричеством; электроэнергия используется для питания компрессоров сжатого воздуха и вентиляторов, необходимых для обеспечения процесса производства. Обеспечение предприятия включает насосные станции для воды, производство пара для обогрева хранилища и сети подачи мазута, увлажнения и/или нагрева шихты, обогрева зданий. Некоторые печи были оборудованы котлами для утилизации избыточной теплоты для производства части или всего необходимого пара.

Для того, чтобы задать рамки для анализа энергопотребления процесса, полезно рассмотреть теоретически требуемую для стекловарения энергию. Теоретические затраты энергии для изготовления разных типов стекла приведены в табл. 5. Расчет основан на предположении о полном использовании всей доступной теплоты и имеет три составных части:

- теплота на реакцию формирования стекла из сырьевых материалов;
- теплота и энтальпия для повышения температуры стекла от 20 °C до 1500 °C;
- содержание теплоты в газах (в первую очередь, CO₂), выделяющихся из шихты при плавлении.

Таблица 5. Теоретическая требуемая теплота для приготовления стекла типичных составов

	Натрий-кальций- силикатное (листовое / тарное стекло), ГДж/т	Боро-силикатное стекло (8 % В₂О₃) ГДж/т	Хрустальное стекло (19 % PbO) ГДж/т
Теплота реакции	0.49	0.41	0.40
Энтальпия стекла	1.89	1.70	1.69
Энтальпия выделяющихся газов	0.30	0.14	0.16
Теоретическая требуемая теплота	2.68	2.25	2.25

Реальная потребность в энергии в различных подотраслях варьирует в широких пределах и составляет от примерно 3.5 до более чем 40 ГДж/т. Эта величина существенно зависит от конструкции печи, масштабов и метода производства. Однако большая доля стекла производится в больших печах, и энергопотребление на стекловарение обычно не превышает 8 ГДж/т. Энергопотребление для рассматриваемых подотраслей подробнее рассматривается ниже.

¹ Например, коэффициент перевода электроэнергии в среднем составляет 2.6, т.е. потребление 1 ГДж (278 тыс кВт) электроэнергии эквивалентно *по затратам энергоресурсов* потреблению 2,6 ГДж ископаемого топлива, т.е., например, 77.6 тыс нм³ природного газа.

Поскольку производство стекла является настолько энергоемким и высокотемпературным процессом, имеются явные возможности для потери теплоты. В последние годы был достигнут существенный прогресс во внедрении мер энергоэффективности, и некоторые процессы (например, большие регенеративные печи) с учетом естественных ограничений процесса приближаются к теоретическому минимуму по требуемой для стекловарения теплоте.

Современная регенеративная печь может иметь общую тепловую эффективность около 50 % (максимально 60 %), причем потери с дымовыми газами составляют около 20 %, а структурные потери — основную часть оставшихся потерь. Тепловая эффективность сравнима с другими крупномасштабными процессами сжигания, в частности, производством электроэнергии, обычно имеющим тепловую эффективность около 30%. Потери тепла от огнеупорной кладки в окружающую среду пропорциональны размерам печи, в основном из-за изменения отношения площади отопляемой поверхности варочного бассейна к объему регенеративных насадок. Электрические печи и печи с принудительным кислородным дутьем обычно имеют лучшие удельные характеристики по сравнению с печами на ископаемом топливе, но имеют и связанные с ними недостатки, которые также обсуждаются в этом документе.

Некоторые общие факторы, определяющие энергопотребление для печей на ископаемом топливе обсуждаются ниже. Для каждого конкретного предприятия важно учитывать местные особенности, которые будут влиять на применимость общих замечаний. Те же факторы влияют и на удельные (к т стекломассы) выбросы веществ, напрямую связанных с количеством сожженного топлива, в особенности CO_2 , NO_x и SO_2 .

1. Мощность печи существенно влияет на энергопотребление на тонну сваренной стекломассы, поскольку большие печи по своей сути более энергоэффективны из-за меньшего соотношения площади поверхности к объему.
2. Загрузка печи также оказывает заметное влияние, и большинство печей достигает пика энергоэффективности при максимальной загрузке. Изменения в использовании производительности печи в основной степени определяются рыночными потребностями и могут быть значительными, особенно для определенных категорий тарного и сортового стекла.
3. Износ печи также способствует снижению тепловой эффективности. К концу кампании энергопотребление на тонну стекломассы может быть выше вплоть до 20% по сравнению с началом кампании.
4. Использование электроподогрева повышает эффективность печи. Однако если принять во внимание стоимость электроэнергии и эффективность производства и распределения энергии, общее изменение становится менее значительным или даже негативным. Электроподогрев обычно используется для повышения производительности печи, а не для повышения ее энергоэффективности.
5. Использование стеклобоя может существенно снизить потребление энергии, поскольку химическая энергия, необходимая для плавления сырьевых материалов, уже поглощена. Обычно повышение доли стеклобоя на каждые 10% приводит к снижению потребления энергии на варку на 2-3%.
6. Принудительное кислородное дутье также может снизить потребление энергии, особенно для малых печей. Удаление основной доли азота из атмосферы сгорания уменьшает объем дымовых газов на 60-80%. Таким образом, нет необходимости в нагревании атмосферного азота до температур пламени.

Энергоэффективность является сложной проблемой, для решения которой разработаны различные меры, обсуждаемые ниже. С 1960-х гг. стекольная промышленность Европы в целом уменьшала удельное потребление на приблизительно 1.5% в год. На сегодня, по мере приближения к термодинамическому минимуму, темпы снижения удельного энергопотребления сокращаются.

В таблице 6 приведены обобщенные данные для современных энергоэффективных печей.

Таблица 6. Примеры удельного потребления для стекловаренных печей определенного типа

Тип ванной печи	Тип стекла	Площадь бассейна ² , м ²	Глубина бассейна в зоне варки, мм	Количество стекломассы в объеме бассейна, т	Соотношение длина / ширина бассейна	Производительность, по сваренной стекломассе т/сут	Производительность с площади варки, т/м ² ·сут	Удельное энергопотребление ³ , кДж/кг стекломассы
Регенеративная печь с поперечным направлением пламени	Тарное стекло	15 – 155	1200 – 1700	50 – 500	1.9 – 3.0 : 1	40 – 500	2.5 – 4.0	4200
Регенеративная печь с подковообразным направлением пламени	Тарное стекло	15 – 140	1200 – 1700	50 – 500	1.9 – 2.5 : 1	40 – 450	2.5 – 4.0	3800
Печь с рекуперативным подогревом воздуха	Тарное стекло	до 250	1100 – 1600	50 – 650	2.0 – 2.8 : 1	40 – 450	2.0 – 3.0	5000
Печь с принудительным кислородным дутьем ⁴	Тарное стекло	110 – 154	1300 – 1700	390 – 600	2.0 – 2.4 : 1	350 – 425	2.3 – 3.5	3050 – 3500
Регенеративная печь с поперечным направлением пламени	Листовое стекло	100 – 400	1200 – 1400	300 – 2500	2.1 – 2.8 : 1	150 – 900	2.3 – 2.7	6300
Регенеративная печь с поперечным направлением пламени	Стекло для телеэкранов	70 – 300	900 – 1100	160 – 700	2.0 – 3.0 : 1	100 – 500	1.1 – 1.8	8300
Рекуперативная печь	Стеклопосуда	15 – 60	1100 – 1300	40 – 180	1.8 – 2.2 : 1	15 – 120	1.0 – 2.0	6700
Рекуперативная печь	Стекловолокно	15 – 110	800 – 1500	50 – 200	2.8 : 1	30 – 350	3.4	4300

² Площадь зоны варочного бассейна для провара шихты и осветления стекломассы; обычно площадь между загрузочным карманом и протоком; для печей флот-процесса — без учета зоны кондиционирования.

³ Удельное потребление энергии без выработки и питателей за время запуска и нормального функционирования (старение ванны 0.1 – 0.2 % в месяц, без электроподогрева, подогрева расплава и использования избыточного тепла), приведенное к 70 % стеклобоя для тарного стекла, 20 % стеклобоя для флот-стекла, 40 % стеклобоя для телевизионного стекла и стеклопосуды. Экономия энергии благодаря 1 % дополнительного использования стеклобоя — от 0.15% до 0.3 %.

Данные по удельному энергопотреблению являются оценочными и приведены в качестве руководства для новых средних и больших предприятий. Они не должны использоваться для рассмотрения энергетического баланса в связи со значительными различиями индивидуальных случаев. Фактическое удельное энергопотребление зависит не только от содержания стеклобоя и возраста печи, но и, среди прочего, от состава шихты, подогрева воздуха, метода загрузки шихты, изоляции бассейна и требований по качеству стекла.

⁴ Указанные данные основаны на опыте работы двух промышленных предприятий, использующих кислород-топливную технологию. Энергия, требуемая для производства кислорода, не включена в удельное потребление энергии.

Стеклотарное производство

Как уже отмечено ранее, стеклотарное производство — крупнейшая подотрасль в ЕС. В 1997 г. функционировали 295 печей различных типов: регенеративные с поперечным направлением пламени, регенеративные с подковообразным направлением пламени, рекуперативные, электрические, печи с принудительным кислородным дутьем; размеры печей варьировали от менее чем 50000 т в год (10000 для производства парфюмерной тары) до более чем 150000 т в год. Производство предприятия, имеющего несколько печей, может составлять более 1000 т в год. Естественно, такая крупная и неоднородная подотрасль связана с существенными различиями в материальном балансе — используемых материалах, продукции, выбросах. Впрочем, продукция данной подотрасли практически исключительно производится из натрий-кальций-силикатного стекла, таким образом, различия в используемых сырьевых материалах ограничены.

Отношение входного потока сырьевых материалов к получаемой стекломассе может отличаться в зависимости от доли используемого стеклобоя, что влияет на газообразные потери сырьевых материалов при стекловарении. Сушка и угар шихты могут определять потери от 3% до 20% входного потока, и 1 т стеклобоя заменяет приблизительно 1.2 т шихты. Доля стеклобоя составляет от 50% до более чем 90%, когда основная доля отходов стекла направляется на переработку в печи.

В таблице 7 ниже показаны основные входящие и выходящие потоки процесса для типичных печей среднего размера.

Таблица 7. Обобщенные входящие и выходящие потоки для процесса изготовления стеклотары

	Единицы на т стек- ломассы	Диапазон (среднее значение)		
		от	до	среднее
Входящие потоки				
Возвратный стеклобой	т	0	0.85	(0.40)
Песок	т	0.04	0.66	(0.35)
Карбонаты	т	0.02	0.40	(0.20)
Минеральные добавки — компоненты шихты	т	0.002	0.05	(0.02)
Огнеупоры печи	т	0.005	0.01	(0.008)
Упаковочные материалы	т	0.040	0.080	(0.045)
Формы и проч.	т	0.004	0.007	(0.005)
Энергия, жидкое и газообразное топливо, всего ⁵	ГДж	4	14	(6.5)
Электроэнергия, всего ⁵	ГДж	0.6	1.5	(0.8)
Вода	м ³	0.3	10	(1.8)

⁵ Полное энергопотребление (печь, выработка, отжиг и др.) для типичного предприятия, использующего печи на ископаемом топливе.

	Единицы на т стек- ломассы	Диапазон (среднее значение)		
		от	до	среднее
Выходящие потоки				
Готовая упакованная продукция	т	0.75	0.97	(0.91)
Выбросы в атмосферу				
CO ₂	кг	300.	1000.	(430.)
NO _x	кг	1.2	3.9	(2.4)
SO _x	кг	0.5	7.1	(2.5)
пыль (без очистки)	кг	0.2	0.6	(0.4)
пыль (с очисткой)	кг	0.002	0.05	(0.024)
HCl (без очистки)	кг	0.02	0.08	(0.041)
HCl (с очисткой)	кг	0.01	0.06	(0.028)
HF (без очистки)	кг	0.001	0.022	(0.008)
HF (с очисткой)	кг	0.001	0.0011	(0.003)
металлы (без очистки)	кг	0.001	0.011	(0.006)
металлы (с очисткой)	кг	0.000	0.002	(0.001)
H ₂ O (испарение и сжигание)	т	0.3	10	(1.8)
Сточные воды	м ³	0.2	9.9	(1.6)
Отходы на переработку	т	0.002	0.006	(0.005)
Другие отходы	т	0.003	0.015	(0.005)

Потребление энергии

Энергия, необходимая для стекловарения, обычно составляет более 75% общего энергопотребления производства тарной продукции из стекла. Другими значимыми областями, связанными с потреблением энергии, являются питатели, процесс формования (сжатый воздух и воздушное охлаждение форм), отжиг, обогрев и обеспечение предприятия. Типичное распределение потребления энергии приведено на рис. 1.



Рисунок 1. Потребление энергии на типичном стеклотарном предприятии

Потребление энергии на процесс зависит от множества факторов, целый ряд которых перечислен выше. Диапазон энергопотребления, встречающийся на предприятиях подотрасли, чрезвычайно широк (только на стекловарение — от 3.2 до 12.2 ГДж/т стекломассы). Однако по имеющимся оценкам, большинство предприятий попадает в диапазон от 4.5 до 7.0 ГДж/т стекломассы и от 6.5 до 9.0 ГДж/т готовой продукции. Для некоторой продукции очень высокого качества последняя величина может быть значительно выше.

Производство сортового стекла

Как уже упоминалось, подотрасль производства сортового стекла очень неоднородна, и это определяет значительные различия во входных и выходных характеристиках процессов. При производстве продукции из натрий-кальций-силикатного стекла выход годных изделий составляет от 50 до 90 % (в среднем 85 %) от входящих сырьевых материалов, для свинцового хрусталя это отношение составляет от 35 % до 80 % (в среднем 75 %). Более низкое значение для свинцового хрусталя обусловлено совокупностью различных факторов, среди которых большая доля резки и полировки, и более высокие требования к качеству. При производстве других типов сортового стекла (хрустального, опалового, боросиликатного) это отношение находится в пределах диапазона, заданного этими двумя типами продукции. В таблице 8 приведены основные входные и выходные параметры для натрий-кальций-силикатного стекла и свинцового хрусталя; значения для остальных типов сортового стекла будут находиться в этом диапазоне.

Таблица 8. Обобщенные входящие и выходящие потоки для процесса изготовления сортового стекла

	Единицы на т стекломассы	Натрий-кальций-силикатное стекло диапазон (среднее)	Свинцовый хрусталь диапазон (среднее)
Входящие потоки			
Энергия, жидкое или газообразное топливо	ГДж	5 – 14 (9)	0.5 – 5 (3)
Электроэнергия	ГДж	1 – 4 (2.5)	1 – 6(4)
Песок	т	0.65 – 0.75 (0.6)	0.20 – 0.50 (0.42)
Карбонаты	т	0.3 – 0.42 (0.34)	0.08 – 0.20(0.14)
Оксид свинца	т		0.08 – 0.21 (0.18)
Минеральные вещества — компоненты шихты	т	0.02 – 0.08 (0.04)	0.005 – 0.02 (0.01)
Собственный стеклорой	т	0.15-0.4(0.25)	0.25 – 0.65 (0.35)
Упаковочные материалы	т	0.06-0.20(0.1)	0.06 – 0.20 (0.1)
Формы и проч.	т	0.001 – 0.003 (0.002)	0.001 – 0.003 (0.002)
Вода	м ³	4 – 9 (7)	3 – 70 (7.5)
Фтороводородная к-та (100 %)	кг/т стекла на хим. полировку ⁶		40 – 130 (65)
Серная к-та (96 %)	т/тHF(100%) ⁶		1 – 10 (5)
Гидроксид натрия	т/тHF(100%) ⁶		0 – 0.2 (0.1)
Гидроксид кальция	т/тHF(100%) ⁶		1 – 10 (4)
Свежая вода на отмывку	т/тHF(100%) ⁶		0.025 – 0.07 (0.05)

⁶ Для химической полировки потребление 100% фтороводородной к-ты используется в качестве основы для получения приведенных (сравнимых) данных, поскольку в этом случае учитывается отношение площади поверхности к объему. Потребление 100 % HF/т стекла, проходящего химическую полировку, будет зависеть от отношения площади поверхности к объему и соответственно от типа полируемых предметов.

	Единицы на т стекломассы	Натрий-кальций-силикатное стекло диапазон (среднее)	Свинцовый хрусталь диапазон (среднее)
Выходящие потоки			
Готовая упакованная продукция	т	0.5 – 0.9 (0.85)	0.35 – 0.8 (0.75)
Выбросы в атмосферу	кг		
CO ₂		150 -1000 (700)	150 – 400 (300)
NO _x		0.9 – 11 (4.8)	0.9 – 5.0 (1)
SO _x		0.1 – 2.8 (0.7)	0.1 – 1.0(0.2)
Пыль		0.001 – 0.8 (0.4)	0.001 – 0.1 (0.02)
H ₂ O		60 – 500 (300)	60 – 250 (120)
Сточные воды	м ³	3.6 – 9.1 (6.3)	2.7 – 70 (6.8)
Собственный стеклобой	т	0.15 – 0.4 (0.25)	0.25 – 0.65 (0.35)
Отходы на переработку	кг	10 – 60 (30)	10 – 60 (30)
Другие отходы	кг	6 – 50 (10)	6 – 50 (10)
Отходы на переработку			
PbSO ₄ O ₂ PbCO ₃	т/THF(100%) ⁶		0.2 – 1.5 (0.8)
CaSO ₄	т/THF(100%) ⁶		2 – 20 (7.5)
Отходы на захоронение			
Отходы нарезки грани	т/THF(100%) ⁶		0.3 – 0.7 (0.45)
Отходы, содержащие тяжелые металлы	т/THF(100%) ⁶		0.1 – 0.5 (0.3)

Потребление энергии

Анализ энергопотребления в подотрасли особенно сложен из-за ее разнообразия и использования различных методов стекловарения. Крупносерийное производство столовой посуды из натрий-кальций-силикатного стекла более похоже на производство стеклотары, и характеризуется сравнимым распределением энергопотребления. Впрочем, большая доля энергии расходуется на обработку (в частности, на огневую полировку). Удельное энергопотребление в этой подотрасли выше, чем в стеклотарной, из-за меньшего размера печей, несколько более высоких температур в печи и большего, до 1.5 раз, обращения стекломассы в объеме бассейна печи.

Некоторые процессы в подотрасли, в частности, производство свинцового хрусталя, осуществляются в намного меньших масштабах и даже с применением горшковых печей. Распределение энергопотребления для производства высококачественного свинцового хрусталя с применением горшковых печей приведено на рисунке 2. Это распределение, впрочем, не является типичным для подотрасли.

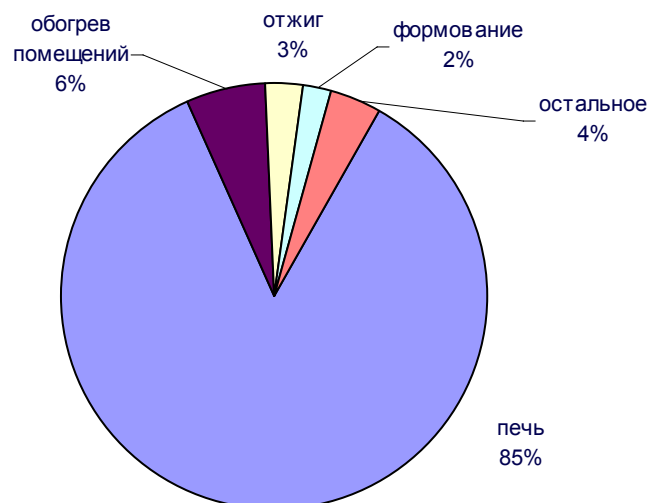


Рисунок 2. Потребление энергии при производстве свинцового хрусталя с помощью горшковой печи

Общее энергопотребление в производстве свинцового хрусталя может достигать 60 ГДж/т готовой продукции притом, что расчетное энергопотребление составляет только 2.5 ГДж/т. Различие объясняется множеством факторов, среди которых основные:

- Высокие требования к качеству, приводящие к более низкой доле годных изделий. Горшок медленно растворяется стеклом, что приводит к образованию свилей или появлению камня в стекле.
- Стекло часто обрабатывается вручную, и выход формования также может быть ниже 50 %; кроме того, может требоваться дополнительный нагрев изделия при формовании.
- Горшки должны быть прогреты до высокой температуры до использования и они имеют очень ограниченные сроки жизни по сравнению с печами непрерывного действия.

Электроварка свинцового хрусталя позволяет использовать огнеупоры высокого качества, обеспечивающие намного лучшее качество стекла и потому меньшую долю брака стекла и лучшее соотношение выхода в годное. Поскольку электрическая варка осуществляется в непрерывном режиме, обычно ее применение связано с применением автоматического формования. Эти факторы могут обеспечить энергопотребление в рамках 25 ГДж/т продукции. Другие непрерывные методы стекловарения могут обеспечить сходное, более низкое энергопотребление.

Выбор методов для оптимизации энергопотребления стекловарения

Производство стекла представляет собой чрезвычайно энергоемкий процесс, и выбор источника энергии, методов нагрева и утилизации теплоты является определяющим для разработки конструкции печи, энергоэффективности и экономической эффективности процесса. Те же факторы определяют экологическую результативность процесса. В этом разделе обсуждается выбор методов стекловарения и конструкции печи, а также методы, позволяющие снизить энергопотребление процесса стекловарения, которое обычно отвечает за более чем 75 % общей потребляемой энергии. Экономия энергии связана не только с экономическими выгодами, но и с повышением экологической результативности, в частности, за счет снижения удельных выбросов в атмосферу, включая CO_2 , NO_x и SO_2 , а также твердые частицы.

Выбор метода стекловарения определяется экономическими и технологическими факторами, основные из которых следующие: желаемая производительность, состав стекла, связанные капитальные и текущие затраты в течение продолжительности кампании печи, в т.ч. цены на топливо, существующая инфраструктура. При этом технологические и экономические требования являются

определяющими. Важной частью текущих расходов является вклад энергопотребления, и обычно выбирается наиболее энергоэффективная возможная конструкция.

Каждый из методов стекловарения имеет свои преимущества, недостатки и ограничения. Например, на момент написания Справочника лучшим методом для производства больших объемов стекла с помощью флоат-процесса было использование регенеративных печей с поперечным направлением пламени. Альтернативные методы либо не до конца показали себя в подотрасли (например, принудительное кислородное дутье) или негативно сказываются на экономических или технических аспектах производства (например, электрические печи или рекуперативные печи). Как правило (в отношении которого неизбежно бывают исключения) используются следующие типы печей:

- Для производства больших объемов стекла (более 500 т/сут) практически всегда используются регенеративные печи с поперечным направлением пламени.
- Для печей средней производительности (от 100 до 500 т/сут) обычно предпочитают конструкцию с подковообразным направлением пламени, хотя применяются и регенеративные печи с поперечным направлением пламени, рекуперативные печи прямого нагрева, а в ряде случаев — печи с принудительным кислородным дутьем или электрические печи.
- Для установок малой производительности (от 25 до 100 т/сутки) обычно используются рекуперативные печи прямого нагрева, регенеративные печи с подковообразным направлением пламени, электрические печи и печи с принудительным кислородным дутьем.

В стекольной отрасли продолжает расти использование природного газа, что определяется его высокой чистотой, легкостью управления процессом, и отсутствием необходимости в емкостях для его хранения. Многие компании также предпочитают природный газ жидкому топливу для того, чтобы снизить выбросы оксида серы. В предшествующие десятилетия основным топливом для стекловарения было жидкое топливо, от тяжелого до легкого и с различной степенью чистоты и содержанием серы. Общее мнение в отрасли состоит в том, что в связи с большей излучающей способностью пламени жидкого топлива оно обеспечивает более эффективную передачу энергии расплаву. По мере накопления опыта использования природного газа эффективность и возможности управления процессом, связанные с использованием газа, приближаются к уровням, достигнутым в отношении жидкого топлива.

Многие большие печи оборудованы таким образом, чтобы использовать и природный газ и жидкое топливо, и для смены топлива требуется только смена горелок. Во многих случаях снабжение газом в пиковые периоды может быть непостоянным, и это вызывает необходимость смены топлива. Вполне обычной также является практика применения жидкого топлива на одной-двух парах горелок печей, в основном использующих газ, для увеличения возможностей контроля поступающей теплоты.

Третьим типичным источником энергии для стекловарения является электроэнергия. Она может использоваться как единственный источник и в комбинации с ископаемым топливом, как описано ниже. Электроэнергия может применяться для передачи энергии тремя основными способами: резистивный нагрев, когда ток проходит через стекломассу; индукционный нагрев, когда теплота вводится за счет изменения окружающих магнитных полей; и путем использования нагревательных элементов. Коммерческое применение в стекольной промышленности нашел только первый способ, и только он будет описан ниже.

Регенеративные печи

Печи этого типа обычно более эффективны по сравнению с другими традиционными типами печей, использующих ископаемое топливо, в связи с более эффективной системой подогрева воздуха для сжигания топлива, обеспечивающей нагрев до 1400 °С. Низкое энергопотребление на тонну стекломассы приводит к снижению удельных выбросов загрязняющих веществ и CO₂, но более высокие температуры подогрева воздуха приводят к более значительному образованию NO_x. Впрочем, в ряде случаев меры по контролю образования NO_x позволяют достичь лучших результатов по выбросам NO_x на печах с поперечным направлением пламени.

Из двух возможных типов регенеративных печей печи с подковообразным направлением пламени обычно характеризуются лучшей энергоэффективностью и более низкими уровнями выбросов. Их

конструкция также несколько дешевле, хотя обеспечивает меньше возможностей по управлению распределением температур в печи.

Высокие капитальные затраты на регенеративные печи означают, что обычно их применение экономически целесообразно для больших объемов производства (обычно более 100 т стекломассы в сутки, хотя есть примеры и меньших печей). Для печей со съемом более 500 т стекломассы в сутки и для всех печей флоат-процесса для того, чтобы обеспечить лучший контроль температур по длине печи, обычно используется поперечное направление пламени.

Рекуперативные печи

Рекуператоры — другой распространенный метод утилизации теплоты, обычно использующийся на малых печах. Хотя исходно печи прямого нагрева не обязательно оснащались рекуператорами, на сегодня эти два понятия стали практически синонимами. В рекуперативных печах поступающий воздух нагревается непрямым образом за счет пропускания через металлический (или в исключительных случаях керамический) теплообменник. Поскольку температуры подогрева для металлических рекуператоров ограничены величиной 800 °С, рекуперативные печи менее эффективны с точки зрения использования энергии по сравнению с регенеративными. Тем не менее, они позволяют использовать значительную долю теплоты дымовых газов. Повышение энергоэффективности возможно за счет дополнительных мер, например, электроподогрева, котлов-утилизаторов избыточной теплоты, подогрева газа, а также подогрева шихты и стеклобоя. Более низкие температуры подогрева воздуха позволяют достичь хороших результатов в отношении контроля образования NO_x . Одним из следствий применения этого метода является то, что удельная производительность рекуперативных печей ограничена величиной 2 т/м²·сут, что существенно ниже по сравнению с типичной производительностью регенеративных печей (в частности, стеклотарной подотрасли), составляющей 3,3 т/м²·сут. Этот недостаток может быть частично скомпенсирован электроподогревом.

Поскольку конструкция печи прямого нагрева относительно недорога и позволяет обеспечить очень хорошую управляемость распределением температур в бассейне, такие печи применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую гибкость процесса с минимальными капитальными затратами, в особенности в тех случаях/, когда объем производства слишком мал для того, чтобы оправдать применение регенераторов. Он более подходит для печей малого объема, хотя известны и рекуперативные печи большой производительности (до 400 т/сут).

Принудительное кислородное дутье

Этот метод основан на замене воздуха для горения кислородом (чистотой больше 90 %). Удаление основной доли азота из атмосферы горения ведет к уменьшению объема дымовых газов на 75-80% в зависимости от чистоты используемого кислорода. В результате обеспечивается экономия энергии, поскольку нет необходимости в нагревании атмосферного азота до температуры пламени. Масштаб достигаемых результатов зависит от сравниваемых печей и обсуждается ниже. Естественно, существенно снижается и образование NO_x , в качестве источников которого служат остаточный азот в подающемся кислороде (криогенный метод: меньше 0,5 %, вакуумный: 4-6 %), азот в топливе (содержание в природном газе 2-15 %), азот, выделяющийся в результате разложения нитратов, и азот из подсосов воздуха (через неплотности в огнеупорной кладке). В связи с высокими температурами пламени остаточный азот легче преобразуется в NO_x , и даже относительно низкие концентрации N_2 приводят к значительным выбросам оксидов азота.

В целом печи с принудительным кислородным дутьем основаны на конструкции печи прямого нагрева, имеют несколько боковых горелок и один порт дымовых газов. Современные печи имеют конструкцию, оптимизированную для использования кислорода и минимизации образования NO_x . Однако в печах с принудительным кислородным дутьем не используются методы утилизации избыточной теплоты для нагрева поступающего на горение кислорода в связи с требованиями безопасности.

Дымовые газы на выходе из печи имеют довольно высокую температуру — 1200-1300 °С и обычно требуется их охлаждение. Из-за высокого содержания воды и концентрации веществ, вызывающих коррозию (напр., хлоридов и сульфатов) охлаждение обычно осуществляется за счет разбавления воздухом.

Горелки для принудительного кислородного дутья должны иметь специальную конструкцию, отличную от традиционных газо-воздушных систем. Со времени появления метода конструкция горелок претерпела значительные модификации; сейчас используются высокоспециализированные горелки с низким образованием NO_x , специально разработанные для стекловарения. Ниже перечислены основные характеристики коммерческих систем:

- Более длинное и широкое пламя, имеющее большую светимость и дающее более глубокую и однородную теплопередачу.
- Более плоское пламя с широкой областью покрытия.
- Задержанное перемешивание топлива и кислорода для уменьшения пиковых температур пламени в зоне высоких концентраций O_2 .
- Не требуется водяное охлаждение.
- Пламя может настраиваться в отношении мощности и формы.
- Могут использоваться различные виды топлива.

Кислород может либо доставляться на площадку, либо производиться на ней. За исключением очень маленьких установок требуемые объемы кислорода обычно определяют необходимость в самостоятельном производстве кислорода. Существуют три основных метода получения кислорода: криогенный, абсорбционный и мембранный. Кислородные установки на предприятии обеспечиваются также хранилищем жидкого кислорода.

Криогенный метод заключается в сжатии воздуха и пропускании его через очистную установку для удаления пыли, воды, диоксида углерода и следовых примесей, которые могут вызвать повреждение системы. Очищенный воздух затем охлаждается и пропускается через низкотемпературную дистилляционную колонну, где разделяется на составляющие. Полученные газы могут нагреваться в теплообменниках для получения газообразных кислорода и азота, а если необходимо, из холодной части установки может быть получен жидкий кислород.

Абсорбционный метод обычно реализуется в одном из двух вариантов: с удалением азота вакуумом или под давлением. В обоих случаях процесс происходит при нормальных температурах. Сжатый воздух запускается в нижнюю часть одной из двух емкостей абсорбера, заполненных цеолитом, который абсорбирует основную долю азота. Кислород затем удаляется из верхней части емкости до тех пор, пока цеолит не насыщается азотом. Затем воздух направляется во вторую емкость, а в это время азот из первой емкости удаляется в атмосферу под давлением или под вакуумом. Вакуумная система обычно имеет наиболее высокую эффективность.

Абсорбционный метод существенно дешевле криогенного, но имеет ограничения по мощности и обычно используется при не очень больших потребностях в кислороде. Он подходит для предприятий, использующих одну или две печи с принудительным кислородным дутьем, в то время как предприятия, применяющие большое число печей или печи с высокой потребностью в кислороде (например, печи флоат-процесса) могут предпочесть реализацию криогенного метода. Выбор в основном определяется экономическими факторами.

Разделение (обогащение) газов через мембраны реализуется благодаря различной их проницаемости для компонентов газовой смеси (воздуха). Аппараты для мембранного разделения газов представляют собой замкнутые объемы, разделенные мембранами на две полости. Движущая сила процесса — поддерживаемая постоянной разность парциальных давлений газов по обе стороны мембраны. Воздух, обогащенный кислородом, обычно получают с помощью пластин из поливинилтриметилсилана. Мембранным разделением получают, как правило, обогащенный кислородом (до 30-60% по объемной концентрации) воздух. При этом установки, производящие смеси газов с 35-40% кислорода, достаточно экономичны: для обеспечения малых печей требуются небольшие капитальные затраты; эксплуатационные затраты вообще незначительны. При увеличении доли кислорода при неизменной мощности капитальные затраты возрастают экспоненциально.

Одним из основных преимуществ принудительного кислородного дутья является потенциально достигаемая экономия энергии. Обычно именно масштаб возможной экономии является ключевым фактором, определяющим экономическую целесообразность применения метода в конкретном случае.

Экономия энергии может превышать 50 % на малых, не эффективных с тепловой точки зрения печах. Для средней по размеру рекуперативной печи без применения специальных мер по экономии энергии, стандартным уровнем теплоизоляции и использованием только внутреннего стекло-

боя, переход на принудительное кислородное дутье позволит снизить потребление энергии на 20-50% (обычно в диапазоне 25-35%). Однако для больших энергоэффективных регенеративных печей с оптимизированными тепловыми характеристиками экономия будет намного меньшей (в диапазоне 5-10%) и потенциально стремящейся к нулю. В таком случае маловероятно, что экономия энергии компенсирует стоимость кислорода.

Меры по экономии энергии, применяемые для традиционных печей (в частности, применение котлов-утилизаторов избыточной теплоты, высокий уровень теплоизоляции, высокоэффективные горелки, подогрев стеклобоя) не использовались еще настолько же широко на печах с принудительным кислородным дутьем. Имеется ограниченный опыт применения этих методов; в частности, на момент написания этого документа были известны, по крайней мере, две печи, использующие котлы-утилизаторы, и одна — с подогревом стеклобоя. Однако по мере накопления опыта большее число таких мер может применяться в отношении печей с принудительным кислородным дутьем. Для использования большинства из них не существует принципиальных технических препятствий, однако существуют проблемы, которые необходимо решить до масштабного коммерческого применения (например, определение оптимального уровня изоляции, который бы не привел к сокращению продолжительности кампании печи).

Одной из важных проблем, которые в потенциале смогут повысить экономическую эффективность стекловарения с принудительным кислородным дутьем, является утилизация избыточной теплоты дымовых газов. Высокая температура газов повышает потенциал возможной утилизации, но имеется и ряд трудностей. Для того, чтобы обеспечить функционирование очистного оборудования, необходимо организовать охлаждение поступающих в него дымовых газов. Состав дымовых газов также ограничивает использование прямого теплообмена из-за загрязнения конденсированными частицами и коррозии. Эти проблемы усиливаются из-за высоких концентраций веществ в дымовых газах при принудительном кислородном дутье.

Потенциально наиболее эффективным способом утилизации избыточной теплоты может быть использование системы подогрева стеклобоя и шихты. Были проведены первичные испытания этого метода. Проводилась также определенная работа по созданию систем подогрева газа и кислорода, но она не была полностью завершена и эти метод не могут рассматриваться в качестве реально доступных вариантов.

При оценке экологической результативности метода принудительного кислородного дутья следует учитывать и негативное воздействие процесса получения кислорода. В основном оно определяется воздействием при производстве необходимого электричества. Потребление электроэнергии вакуумным абсорбционным методом потребляет в среднем 1,44 МДж на 1 м³ кислорода. В целом воздействие достаточно сложно оценить без конкретных данных в отношении достижимой экономии, эффективности и методов производства электроэнергии и т.п. При этом в общем можно сказать, что для малых и средних печей экологические эффекты экономии энергии за счет применения принудительного кислородного дутья существенно перевешивают воздействие, связанное с производством кислорода.

Принудительное кислородное дутье дает более высокие температуры пламени и в ряде случаев может обеспечить более высокий (до 25%) удельный съем стекломассы. Это особенно важно в тех случаях, когда есть необходимость в увеличении объемов производства, но отсутствует площадь, требуемая для установки традиционной печи большего размера. Эффективности метода в данном случае также способствует отсутствие системы подогрева воздуха. В некоторых случаях принудительное кислородное дутье также облегчает управление процессом и способствует повышению качества стекла. Это в особенности имеет место для ряда специальных стекол, требующих высоких температур варки. Однако высокое содержание кислорода и водяного пара в атмосфере пламенного пространства в некоторых случаях может повлиять на химию стекла определенных типов и потребовать изменения состава шихты.

Существует определенная озабоченность из-за того, что высокие температуры, связанные с применением принудительного кислородного дутья, могут привести к более быстрому износу огнеупоров и тем самым сократить продолжительность кампании печи и возникновению определенных типов брака стекла. Сокращение продолжительности кампании может оказать очень существенное влияние на экономическую эффективность метода, в особенности для больших печей. На сегодня накопленный опыт применения метода варьирует от крайне негативных результатов до многообещающих. Была проведена большая работа, которая позволила существенно снизить мас-

штаб проблем. Некоторые производители боросиликатного стекла сообщали о продленном сроке службы печи, а в ряде случаев при переходе на принудительное кислородное дутье были достигнуты более низкие температуры свода.

Новые высокоизлучающие горелочные системы намного эффективнее традиционных в передаче теплоты стеклу. Вместе с тщательно разработанным проектом печи, точным расположением горелок и огнеупорами высокого качества такие системы существенно облегчают поддержание нормального функционирования печи в допустимом для огнеупоров диапазоне температур. Использование высококачественных огнеупоров повышает капитальные затраты на печь и все еще существует озабоченность в отношении того, что такие материалы могут быть недостаточно устойчивы в определенных ситуациях. Так, при производстве натрий-кальций-силикатного стекла высокое давление водяных паров может привести к увеличению давления паров NaOH, что может негативно сказаться на стабильности огнеупоров, особенно выше уровня стекломассы.

На момент подготовки этого документа возраст самой старой печи с принудительным кислородным дутьем не превышал 10 лет, и в целом опыт применения этого метода на больших печах все еще недостаточен для того, чтобы уверенно говорить о долгосрочном влиянии на продолжительность функционирования печи. Однако метод постоянно развивается, и современные печи, скорее всего, рассчитаны на более длительные кампании, чем первые промышленные образцы.

В ряде подотраслей стекольной промышленности принудительное кислородное дутье все еще рассматривается как развивающийся и связанный со значительными финансовыми рисками метод. Однако он уже хорошо развит и становится широко используемым по мере роста числа применяющих его предприятий.

По существующим оценкам от 5 до 10 % производимого в мире стекла выпускается с помощью принудительного кислородного дутья. Известны примеры успешного применения этого метода в ряде подотраслей, в частности, в производстве стеклотары, стекловолокна, специальных стекол (особенно телевизионных стекол), сортовой посуды, и т.д.

Важной составляющей, определяющей экономическую эффективность метода, является отсутствие необходимости в системе подогрева воздуха и соответствующее снижение капитальных затрат по сравнению с традиционными регенеративными и рекуперативными печами сравнимой производительности. Это наиболее значимо при строительстве новых печей, когда можно полностью избежать затрат на систему подогрева воздуха. Самые современные горелки для принудительного кислородного дутья обычно дороже аналогичных горелок для традиционных печей, а стоимость системы обеспечения кислородом может быть достаточно велика (300-450 тыс. Евро). Однако для большинства печей дополнительные затраты на обеспечение кислородом намного ниже экономии из-за отсутствия системы подогрева воздуха. Из-за возможности влияния высоких температур на срок службы огнеупоров может потребоваться использование более дорогих огнеупоров свода печи, что существенно снизит экономию капитальных расходов. Регенераторы печей могут перестраиваться лишь частично с момента установки печи на этом месте и, хотя экономия из-за отсутствия необходимости в них будет значительной, она окажется меньше, чем при строительстве новой печи. В целом, экономия капитальных затрат на печь при использовании принудительного кислородного дутья составляет 30-40% по сравнению с новыми регенеративными печами и около 20% по сравнению с рекуперативными печами. Если компания сама устанавливает и использует кислородный завод, капитальные затраты на него могут быть до 10% стоимости печи.

Если не учитывать озабоченность сроком службы огнеупоров, в большинстве случаев фактором, определяющим экономическую эффективность применения принудительного кислородного дутья, будет разница в стоимости сэкономленной энергии и стоимости кислорода. Она существенно зависит от местных особенностей (в частности, стоимости различных энергоносителей) и может быть намного выше для малых печей.

Метод частичного принудительного кислородного дутья используется в стекольной промышленности много лет. При этом либо воздух для горения в традиционной печи дополнительно насыщается кислородом для повышения теплопередачи, или печь оснащается дополнительными горелками с подачей кислорода. Обычно этот метод применяется для устранения проблем, связанных с качеством стекла и недостаточным съемом, поскольку позволяет расположить очень горячее пламя точно на поверхности стекломассы, повысить градиент температур и, тем самым, усилить конвективные потоки в расплаве. Одновременно уменьшается объем дымовых газов при подаче в

печь того же количества энергии. В связи с этим метод часто использовался в тех случаях, когда в печи или регенераторах наблюдались признаки преждевременного разрушения. Однако если этот метод не является одним из элементов тщательно спроектированной и контролируемой системы с низким общим выделением NO_x , образование NO_x может возрасти очень существенно. В связи с этим изолированное использование метода обогащения воздуха для горения кислородом становится менее популярным.

Совместно с применением обогащенного кислородом воздуха для горения для уменьшения образования NO_x может применяться метод ступенчатого сжигания. Суть метода заключается в изменении условий, при которых образуется NO_x . Если топливо и воздух или кислород вводятся в горелку в одной точке, получающееся пламя имеет горячую первичную окислительную зону вблизи от пламенного окна и более холодную вторичную зону дальше от него. Большая часть NO_x образуется в самой горячей зоне. Следовательно, при уменьшении доли воздуха или топлива в горелке можно снизить максимальную температуру пламени и образование NO_x . Недостающие топливо или воздух затем добавляются в зоне горения.

Ступенчатое сжигание за счет подачи воздуха основывается на достехиометрическом сжигании топлива в горелке и добавлении недостающего топлива или воздуха в печь для обеспечения полного сгорания. Возможны различные методы ступенчатого сжигания. Первые опыты по ступенчатому сжиганию с горячим воздухом не дали определенных результатов. Методы ступенчатого сжигания с вдуванием воздуха (blowing air staging, BAS) и ступенчатого сжигания с вдуванием обогащенного кислородом воздуха (oxygen-enriched air staging, OEAS) развиваются в настоящее время в США и предлагаются компанией Combustion Tec. По данным компании такими системами оснащено приблизительно 10 печей и на них достигнуто уменьшение образования NO_x на величину до 70 %. Ступенчатое сжигание за счет подачи топлива основано на следующем принципе: газовое пламя с низким импульсом (около 10% общей энергии) образуется в начале влета регенератора. Это пламя перекрывает основание основного пламени, уменьшая содержание кислорода в нем и его температуру, за счет чего снижается образование NO_x . Этот метод показал себя более успешно, чем ступенчатое сжигание за счет подачи воздуха, и позволяет снизить выбросы NO_x на величину до 35 %.

Стекловарение с комбинированным использованием ископаемого топлива и электроэнергии

Существуют два принципиальных подхода к комбинированному использованию для стекловарения ископаемого топлива и электроэнергии, а именно: обогрев за счет использования энергии топлива и подогрев с помощью электроэнергии, и стекловарение с использованием электроэнергии и вспомогательным подогревом с использованием топлива. Оборудование для электроподогрева установлено на многих печах и может обеспечивать от 2 до 20 % общей энергии на стекловарение. В тарной подотрасли, так же как и при производстве листового стекла, использование электроподогрева обычно ограничивается стоимостью электроэнергии и составляет менее 5 %.

Высокая стоимость электроэнергии, связанная с электроподогревом, обычно означает, что этот метод может использоваться только как средство обеспечения необходимых параметров технологического процесса при условии экономической эффективности. В частности, электроподогрев может использоваться для улучшения конвективных потоков в объеме стекломассы, что приводит к интенсификации теплопередачи и способствует осветлению стекломассы.

Печи, преимущественно использующие электронагрев для стекловарения, распространены гораздо меньше. Обычно при этом пламя используется для нагрева шихты и ускорения плавления. Такой метод обычно применяется для того, чтобы преодолеть некоторые трудности, связанные с функционированием полностью электрических печей.

Стекловарение в электрических печах

Экономическая целесообразность использования электрических печей зависит в основном от разницы цен на электроэнергию и ископаемые топлива. На момент написания этого документа стоимость электричества на единицу энергии в ЕС была в 4-5 раз выше по сравнению со стоимостью жидкого топлива. Стоимость электроэнергии в различных странах ЕС также могла отличаться вплоть до 2 раз. Электрические печи чрезвычайно теплоэффективны, обычно они требуют в 2-4

раза меньше энергии, чем традиционные топливные печи, причем чем меньше печи, тем больше это различие. Кроме того, обычно электрические печи обеспечивают больший удельный съем стекломассы с площади варочного бассейна.

Электрические печи требуют гораздо меньших капитальных затрат на установку и ремонт по сравнению с традиционными печами, что частично компенсирует высокие текущие расходы. Однако такие печи выдерживают меньшую продолжительность кампании до ремонта или полного восстановления; продолжительность кампании составляет от 2 до 6 лет по сравнению с 10-12 годами для традиционных печей. Для малых (10-50 т стекломассы в сутки) печей из-за относительно высоких потерь теплоты в топливных печах электрические печи могут быть более конкурентоспособны.

Существует верхний предел целесообразности использования электрических печей, тесно связанный с более высокой стоимостью электроэнергии. На основе сегодняшней практики можно дать общую оценку целесообразности применения электрических печей, хотя во всех случаях в зависимости от местных условий возможны исключения:

- Использование электрических печей мощностью меньше 75 т обычно может быть оправдано.
- Использование электрических печей мощностью в диапазоне от 75 до 150 т стекломассы в сутки может быть оправдано в определенных условиях.
- Использование электрических печей мощностью более 150 т стекломассы в сутки обычно не может быть оправдано.

При определении целесообразности применения электрических печей необходимо также учитывать особенности требований по качеству продукции, доступную площадь, особенности управления процессом и время жизни различных печей.

Электрические печи могут применяться в различных подотраслях стекольной промышленности, и широко используются, в частности, при производстве специальных стекол, сортовой посуды; в меньшей степени — в стеклотарной подотрасли. Метод также широко используется для производства стекол в тех случаях, когда это потенциально связано с высокой летучестью и токсичностью (например, при производстве хрусталя или опалового стекла) и для продукции с высокой добавленной стоимостью. Обычно электрические печи обеспечивают гомогенное стекло высокого качества, что может быть определяющим для использования метода при производстве сортовой посуды и специальных стекол.

Низкие потери сырьевых материалов, характерные для использования этого метода, облегчают утилизацию уловленной средозащитным оборудованием шихты, а также снижают потери материалов, в особенности значимые для токсичных и/или дорогих материалов, в частности, оксидов свинца, фторидов, соединений мышьяка, буры и т.п.

Полная замена процесса сжигания ископаемого топлива устраняет выделение продуктов горения, в частности тепловых оксидов азота, диоксида углерода, диоксида серы. Однако если учитывать эффективность процессов производства и передачи электроэнергии и связанное с ними выделение загрязняющих веществ, использование электроэнергии для стекловарения является менее эффективным с точки зрения минимизации воздействия на окружающую среду и, в частности, выделения парниковых газов.

Периодическое плавление шихты

Традиционно используемым для периодического производства малых объемов стекла методом является применение горшковой печи, хотя другие методы, такие как ваннные печи периодического действия и Flex Melter приобретают все большую популярность. Выбор метода обычно определяется условиями конкретной установки, в особенности требуемым объемом производства, числом различных используемых составов стекла, а также требованиями клиентов. Основными методами минимизации воздействия на окружающую среду, которые могут применяться к таким печам, являются оптимизация состава шихты и методов сжигания топлива. В связи с конструкцией горшковых печей эти методы обычно будут давать лучшие результаты для ваннных печей периодического действия и частично-непрерывных печей. Там, где это возможно по техническим и экономическим соображениям, следует использовать ваннные печи периодического действия или частично-непрерывные печи, поскольку они обычно позволяют обеспечить большую эффективность использования энергии и меньшие выбросы вредных веществ.

Методы для снижения потребления энергии при стекловарении

Выбор методов стекловарения и конструкции печи

Выбор метода стекловарения является одним из ключевых факторов, определяющих энергоэффективность.

Для обычных печей, использующих ископаемое топливо, основной особенностью конструкции является способ утилизации теплоты дымовых газов для нагрева поступающего воздуха — с помощью регенераторов или рекуператоров. Другим существенным фактором является размер печи.

Регенеративные печи позволяют достичь более высоких, вплоть до 1400 °С, температур подогрева воздуха по сравнению с рекуперативными печами (дающими температуру порядка 800 °С), что обеспечивает лучшую эффективность стекловарения. Чаще всего регенеративные печи больше по размерам, чем рекуперативные, что также делает категорию регенеративных печей в целом более эффективной. Современная регенеративная печь для стеклотарного производства может иметь общую тепловую эффективность около 50%, потери теплоты с дымовыми газами около 20%, и структурными потерями, отвечающими за основную долю оставшейся теплоты. При этом тепловая эффективность рекуперативной печи без дополнительной утилизации теплоты будет ближе к 20%.

Регенеративные печи могут иметь подковообразное или поперечное направление пламени. Печи с подковообразным направлением пламени имеют более высокую тепловую эффективность (выше на величину вплоть до 10%), но возможности управления горением в таких печах более ограничены, и существует верхний предел размеров печи такого типа (в настоящее время около 150 м² для тарного стекла). Печи флотат-процесса менее эффективны, чем печи тарного производства из-за значительно меньшего удельного съема стекломассы в связи с требованиями ко качеству.

Использование избыточной энергии с помощью регенераторов может быть максимизировано путем увеличения количества огнеупорных элементов регенеративных насадок в камерах. На практике это может быть реализовано посредством увеличения камер регенераторов или создания раздельных, но связанных между собой камер, получивших название многоходовых регенераторов. По мере приближения к возможному максимуму утилизации теплоты эффективность таких мер падает. Принципиальным ограничением является стоимость дополнительного огнеупорного материала, и в случае уже существующих печей — ограничения доступного пространства и дополнительные затраты на изменение инфраструктуры печи. Этот принцип чаще реализуется для печей с подковообразным направлением пламени в связи с более простой геометрией регенераторов, хотя он применялся и на печах с поперечным направлением пламени. Модификация структуры регенератора на существующих печах (если это технически и экономически целесообразно) может быть выполнена только в ходе холодного ремонта. Энергопотребление может быть снижено на величину вплоть до 15% по сравнению с аналогичной печью с обычными однопроходными регенераторами.

Значительная доля дополнительного огнеупорного материала, использованного для увеличения регенераторов, выдерживает две и более кампании, таким образом, снижая капитальные затраты. Хотя потенциально повышение температуры подогрева воздуха может приводить к повышению температуры пламени и, следовательно, увеличению образования NO_x, на практике, если применяются меры по контролю образования NO_x, печи с многопроходными регенераторами не отличаются от обычных по выбросам NO_x.

Существует большое количество новых материалов, предназначенных для сохранения теплоты и ее передачи в блоках регенераторов. Самым простым решением является использование огнеупорных кирпичей, установленных в шахматном порядке, что обычно обеспечивает эффективность регенератора порядка 50% (отношение утилизированной теплоты к теплоте, содержащейся в дымовых газах). Однако теплопередача может быть увеличена путем использования насадочных элементов, изготовленных из электроплавленных огнеупоров крестообразной формы, обеспечивающих сокращение расхода топлива на 7 % (по данным источников) по сравнению с печами, оснащенными регенеративными насадками, изготовленными из обычных огнеупорных элементов в форме кирпичей. Кроме того, такие материалы более устойчивы к химическому воздействию аг-

рессивных веществ в дымовых газах и обеспечивают существенно меньшее снижение эффективности регенераторов за период кампании печи.

Максимальная теоретическая эффективность регенератора составляет 80%, поскольку масса дымовых газов превосходит массу поступающего на горение воздуха и теплоемкость дымовых газов выше теплоемкости воздуха. На практике эффективность будет ограничиваться стоимостью и ростом структурных потерь по мере увеличения размеров регенераторов. Таким образом, строительство регенераторов с эффективностью выше 70-75 % неосуществимо.

Улучшение качества огнеупорных материалов позволило обеспечить большую продолжительность кампаний печей с лучшим уровнем теплоизоляции. Максимальные температуры, при которых может функционировать печь, в прошлом являлись сдерживающим фактором для ее хорошей теплоизоляции. В настоящее время теплоизоляция проектируется с учетом всех характеристик печи (изолируемой ее части, температуры, типа стекла и т.п.). Не все части печи могут быть изолированы. Кладка стекловаренного бассейна на уровне линии зеркала стекломассы и в районе протока должны быть открыты для того, чтобы обеспечить охлаждение и продлить кампанию печи. Большинство огнеупорных материалов для стекловаренных печей, использующихся в контакте со стекломассой и для строительства печи, изготавливаются путем литья и имеют очень высокую плотность и малую пористость, и потому устойчивы к расплаву стекла и агрессивным компонентам дымовых газов. Они также имеют более высокую теплопроводность и в целом требуют более высокой теплоизоляции, тем самым, способствуя значительной экономии энергии. При производстве натрий-кальций-силикатного стекла свод печи изготавливается из динаса и плотно изолируется. При этом максимальная температура в печи составляет 1600-1620 °С.

Дополнительная изоляция может быть нанесена на некоторые участки печи без заметного риска для ее структуры. Изоляция напылением волокна может существенно снизить потери теплоты, если ее нанести на структуру регенератора. Этот простой и экономически эффективный метод позволяет снизить структурные потери теплоты регенератором на 50% и обеспечить экономию энергии порядка 5 %. Дополнительным положительным эффектом является герметизация любых щелей и, соответственно, устранение подсоса холодного воздуха и выделения дымовых газов.

Управление горением и выбор источника энергии

В последние десятилетия в ЕС основным для производства стекла было жидкое топливо, хотя популярность природного газа продолжает расти. Использование природного газа ведет к более низким выбросам SO_x , но обычно более высоким выбросам NO_x . Это связано с тем, что пламя природного газа обладает меньшей светимостью и обычно приводит к большему, приблизительно на 7-8%, потреблению энергии. Однако с накоплением опыта использования природного газа уровни результативности постепенно растут и позволяют достичь величин, сравнимых с использованием жидкого топлива. Природный газ также имеет более высокое отношение доли водорода к углероду и таким образом, приводит к меньшим, на величину вплоть до 25%, выбросам CO_2 при фиксированном съеме стекломассы.

Развитие систем с низким выделением NO_x при сжигании также привело к экономии энергии. При уменьшении количества воздуха горения до уровня, близкого к стехиометрическому отношению, снижаются потери теплоты с дымовыми газами. Улучшения в системах горения, теплообмена и общие усовершенствования в управлении процессом, направленные на снижение выбросов NO_x , во многих случаях также привели к более стабильному функционированию и повышенной результативности печей.

Метод обогащения кислородом воздуха горения часто используется для повышения энергоэффективности и увеличения съема стекломассы. Уменьшение объемов газа и более высокие температуры пламени способствуют росту эффективности использования энергии топлива, и, если не используются системы, обеспечивающие низкое образование NO_x , уровень выбросов NO_x существенно возрастает, что ограничивает использование этого метода в изоляции.

Уменьшение отношения воздух-топливо

Обычно печи работают при избытке воздуха в 5-10% (т.е. при избытке кислорода в 1-2 %) для обеспечения полного сгорания. Путем снижения соотношения воздух-топливо до уровней, близких к стехиометрическим, можно достичь существенной экономии энергии и снижения образова-

ния NO_x . Для того, чтобы эффективно использовать этот метод, необходимо постоянно контролировать содержание NO , CO и O_2 в дымовых газах. Если горение окажется ниже стехиометрического, возрастет концентрация CO , изменятся окислительно-восстановительные условия стекломассы и может ускориться разрушение огнеупоров.

Это изменение должно вводиться аккуратно и постепенно с тем, чтобы избежать проблем и достичь лучших результатов. В некоторых случаях (например, в рекуперативных печах) если рассматривать стехиометрию печи в целом, некоторые горелки в самых горячих частях печи могут работать с избытком топлива, другие в более холодных — с небольшим избытком воздуха.

Избыток воздуха в печи определяется как количеством принудительно подаваемого воздуха, так и возможным подсосом через места установки горелок и загрузочный карман. Места установки горелок достаточно легко герметизировать; также возможны меры для избежания подсоса воздуха через карман.

Использование стеклобоя

Использование стороннего стеклобоя при производстве стекла может существенно снизить потребление энергии и может осуществляться на всех типах печей — использующих ископаемое топливо, принудительное кислородное дутье или электроподогрев. Большинство подотраслей в нормальном режиме вторично используют весь внутренний стеклобой. Доля стеклобоя в загружаемом объеме обычно находится в диапазоне от 10 до 25 %.

Стеклобой имеет более низкие требования по энергии, необходимой для плавления, чем сырьевые материалы шихты, поскольку уже прошли эндотермические реакции, связанные с формированием стекла, и масса стеклобоя уже меньше приблизительно на 20% по сравнению с эквивалентным количеством шихты. Таким образом, увеличение доли стеклобоя в загружаемых материалах потенциально позволяет сэкономить энергию; как общее правило можно считать, что каждые дополнительные 10 % стеклобоя приводят к снижению потребления энергии печью на 2,5-3,0 %. Использование стеклобоя также обычно приводит к значительному снижению затрат, поскольку уменьшается потребление и энергии и сырьевых материалов.

Следует различать внутренний, «технологический» стеклобой (стекло, полученное с производственных линий) и сторонний, «покупной» стеклобой (вторично перерабатываемое стекло, полученное от потребителей или других промышленных источников). Состав стороннего стеклобоя менее точно определен и это ограничивает его применение. Высокие требования по качеству продукции могут ограничивать долю стороннего стеклобоя, которую можно использовать в производстве. Однако подотрасль тарного стекла имеет уникальную возможность использования значительных количеств стороннего стеклобоя, полученных в рамках различных схем утилизации стеклянных бутылок. Подотрасли с более высокими требованиями к качеству стекла или недостаточным количеством доступного стороннего стеклобоя (например, производства листового стекла) могут попытаться заключить договоры с крупными потребителями по переработке образующихся у них отходов стекла.

Использование стеклобоя в производстве тарного стекла варьирует от менее чем 20 % до более 90 %; среднее значение для ЕС составляет около 48 %. Доля вторично перерабатываемого стекла существенно различается в странах ЕС в зависимости от практически действующих схем сбора использованного стекла от потребителей. Для продукции тарного стекла высокого качества используются более низкие доли стороннего стеклобоя по сравнению со стандартной продукцией.

В подотрасли сортового стекла требования к качеству обычно не дают использовать в производстве сторонний стеклобой. Использование внутреннего стеклобоя определяется доступностью стеклобоя требуемого качества и состава. В среднем доли используемого внутреннего стеклобоя в загружаемых материалах составляет около 25 % для натрий-кальций-силикатного стекла и 35 % для свинцового хрустала.

Для производства бесцветного стекла допустим очень низкий процент окрашенного стекла, поскольку окрашенное стекло не может быть обесцвечено. По этому схемы вторичной переработки стекла более эффективны если включают разделение по цветам. В рамках ЕС доступны достаточные объемы зеленого и коричневого стекла, но бесцветный стеклобой оказывается менее распространен и в связи с этим печи, варящие цветное стекло, работают при более высокой доле стеклобоя. Стеклобой легче подогреть, чем шихту. Кроме того, сьем стекломассы можно существенно

увеличить, но имеется несколько недостатков, которые следует учитывать при работе с большой долей стеклобоя.

- Металлические включения, такие как, например, крышки бутылок или фольга с винных бутылок, могут серьезно повредить огнеупоры и тем самым сократить кампанию печи. Металлические включения опускаются ко дну бассейна и возникает эффект «бурения». За счет химических реакций металлические включения буквально просверливают отверстия в дне бассейна.
- Керамические включения, такие как осколки глиняных или керамических предметов, нерастворимые в стекломассе, будут образовывать «камень» в получаемой продукции, приводя к браку.
- При высоких уровнях стеклобоя возможность контроля состава и, следовательно, физических характеристик стекломассы снижается, повышая вероятность проблем качества готовой продукции. Изменяющееся содержание органических остатков (остатков пищи, бумаги, пластиков) в особенности влияет на окислительно-восстановительные характеристики среды и может привести к проблемам в отношении окрашивания и осветления стекломассы.
- Алюминиевые крышки и фольга действуют как сильные восстановители, приводя к образованию металлического кремния. Кремний образуется в виде небольших шариков, которые могут существенно уменьшить прочность стекла из-за напряжений, возникающих в связи со значительным различием коэффициентов теплового расширения стекла и кремния.

Котлы-утилизаторы избыточной теплоты

Этот метод основан на пропуске дымовых газов напрямую через соответствующий водотрубный котел для производства пара. Пар может использоваться для обогрева (обогрева помещения или обогрева емкостей и трубопроводов мазута), или посредством турбины использоваться для производства электроэнергии или приведения в движение оборудования, например, компрессоров или вентиляторов секционных машин.

Дымовые газы, поступающие от регенераторов или рекуператоров обычно имеют температуру в диапазоне от 600 °C до 300 °C. Температура на выходе из котла утилизатора определяет возможности по утилизации теплоты и ограничена приблизительно 200 °C из-за риска конденсации в котле и для обеспечения функционирования дымовой трубы. Трубы котла подвержены воздействию дымовых газов печи и на них могут образовываться отложения различных материалов (например, сульфата натрия) и должны периодически очищаться для поддержания эффективности утилизации теплоты. Впрочем, это становится менее важным, если котлы-утилизаторы установлены после пылеулавливающего оборудования.

Применимость и экономическая целесообразность применения этого метода определяется общей эффективностью, которой можно достичь за счет его применения, с учетом эффективности использования полученного пара. На практике котлы-утилизаторы используются только совместно с регенераторными и рекуператорными стекловаренными печами; известно также два случая применения этой методики на печах с принудительным кислородным дутьем. Во многих случаях утилизируемое количество теплоты недостаточно для эффективного получения энергии и обычно возможно только на рекуперативных печах, для больших установок или в тех случаях, когда удастся объединить дымовые газы нескольких печей. Большинство случаев применения котлов-утилизаторов относится к производству листового стекла, хотя они применяются и на некоторых производствах стеклотары.

Капитальные расходы могут превышать 1 млн. Евро с различными сроками окупаемости в зависимости от эффективности и стоимости используемой энергии. В ряде случаев период окупаемости может оказаться слишком большим. Кроме того, постоянное повышение энергоэффективности основных процессов также снижает эффективность котлов-утилизаторов.

Подогрев шихты и стеклобоя

Обычно шихта и стеклобой вводятся в печь в холодном состоянии, однако существует возможность нагрева шихты и стеклобоя за счет использования избыточной теплоты дымовых газов, что обеспечивает существенную экономию энергии. Метод, естественно, применим только к топливным стекловаренным печам. Подогреватели шихты и стеклобоя разрабатываются и устанавливаются в ЕС компаниями GEA/Interprojekt (прямой подогрев), Zippe (непрямой подогрев) и Sorg

(прямой подогрев). Недавно компания Edmeston разработала и установила установку — комбинацию подогревателя стеклобоя и электрофилтра. Эти три существующих системы описываются ниже.

Прямой подогрев

Этот метод использует прямой контакт между дымовыми газами и сырьем (стеклобоя и шихтой) при противоположном их движении. Дымовые газы поступают из канала за регенератором. Они пропускаются через выемки в подогревателе, таким образом вступая в непосредственный контакт с сырьевыми материалами. При этом достигается нагрев стеклобоя до 400 °С. Система включает и обходной канал, позволяющий продолжать работу в тех случаях, когда работа подогревателя неэффективна или невозможна.

Непрямой подогрев

Непрямой подогреватель в принципе представляет собой противоточный теплообменник с теплообменом через пластину, на которой нагреваются сырьевые материалы. Он спроектирован в виде отдельных модулей и состоит из отдельных теплообменников, располагаемых друг над другом. Модули делятся на горизонтальные протоки для дымовых газов и вертикальные — для сырьевых материалов. В протоках сырьевых материалов они движутся сверху вниз под действием силы тяжести. В зависимости от пропускной способности скорость поступающих сырьевых материалов может достигать 1-3 м/ч; при этом они обычно нагреваются приблизительно до 300°С. Дымовые газы подводятся к нижней части теплообменника и направляются вверх через специальные каналы. В отдельных модулях дымовые газы движутся горизонтально. Обычно они охлаждаются приблизительно до 270°С – 300°С.

Фильтр со слоем гранулята Edmeston

Электрофилтр со слоем гранулята Edmeston (electrified granulate bed, EGB) — комбинация электрофилтра для удаления пыли и прямого подогревателя стеклобоя. Горячие дымовые газы направляются в верхнюю часть системы и проходят ионизаторы, заряжающие частицы пыли. Газы затем проходят через слой гранулированного стеклобоя, поляризованный высоковольтным электродом. Заряженные частицы пыли притягиваются стеклобоям, на котором они и оседают. Стеклобой постоянно загружается в аппарат сверху и после нагрева (вплоть до 400° С) вместе с осевшими на нем частицами пыли разгружается вниз, в устройство для подачи шихты и стеклобоя в печь.

Описанные методы приносят существенные положительные результаты. Обычно достигается экономия от 10 до 20 % энергии, снижается выброс NO_x, а при прямом подогреве еще и выброс кислых газов: SO₂, HF, и HCl на 60 %, 50 % и 90 % соответственно. Метод позволяет увеличить производительность печи на 10-15 % без снижения продолжительности кампании. Однако если не увеличить съем, срок службы печи может сократиться. Как уже упоминалось, метод позволяет снизить необходимость в электроподогреве. В связи с использованием стороннего стеклобоя могут возникать проблемы, связанные с неприятным запахом от подогревателя, в связи с разложением включений органических материалов в стеклобой.

Экономическая эффективность подогревателей стеклобоя и шихты сильно зависит от мощности печей и подогревателей. Как пример расходов можно рассматривать непрямой подогреватель производительностью 370 т/сут для тарного производства с электрофилтром, капитальные расходы на который составили 2,5 млн. Евро, из которых 800 тыс. Евро стоил сам подогреватель. Если достигается существенная экономия энергии, срок окупаемости может составить 3-10 лет. Срок окупаемости может быть еще меньше, если установка подогревателя стеклобоя/шихты позволяет существенно снизить использование электроподогрева в печи. На момент подготовки этого документа большинство производителей тарной продукции ЕС не считали подогрев стеклобоя экономически целесообразным. Впрочем, эта позиция может меняться по мере роста цен на энергоносители.

Системы подогрева стеклобоя/шихты теоретически могут устанавливаться на любой стекловаренной печи с долей стеклобоя выше 50 %. Подогрев только шихты проблематичен и не рассматривается как технология, зарекомендовавшая себя на практике. Использование прямого подогрева

приводит к увеличению выбросов твердых частиц (до 2000 мг/нм³) и необходима установка оборудования для их удаления; собранная пыль обычно может направляться в печь. Для того, чтобы снизить потери теплоты при транспортировке после теплообменника следует располагать его как можно ближе к загрузочному карману; идеальным будет расположение непосредственно над загрузчиком. По экономическим причинам температура используемых дымовых газов должна быть не ниже 400-450 °С. Более того, они должны охлаждаться по крайней мере на 200-250 °С. Для того, чтобы избежать агломерации шихты максимальная температура дымовых газов не должна превышать 600 °С.